

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОФАЗНЫХ СПЛОШНЫХ СРЕД В ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

**Аннотация.** В данной работе при помощи программных продуктов Ansys Fluent тестировалась многофазная физико-математическая модель Эйлера описания пузырькового кипящего слоя, основанная на уравнении Навье-Стокса и законе трения Гидаспова. Главным образом исследовались следующие параметры: значения объемных долей твердой фазы в определённых зонах от времени, частота извержения пузырей, частота образования пузырей, частота колебаний давления около газораспределительной системы, эквивалентные диаметры пузырей.

Для описания поведения пузырькового кипящего слоя была создана экспериментальная установка (рис. 1), параметры, которой легли в основу моделирования. Установка представляет собой цилиндр диаметром 0,05 м и высотой 0,5 м. Цилиндр имеет перфорированное дно с 37 отверстиями диаметром 1 мм каждое. Верхняя часть цилиндра открыта.

Под днище подавался газ со скоростями в сечении днища 0,425 м/с и 0,563 м/с. В экспериментах [2] и дискретном моделировании [1] плотным слоем служили несферические семена с эквивалентным диаметром 1,2 мм. В моделировании на основе сплошных сред использовались сферические частицы с диаметром 1,2 мм. Плотность частиц принималась 960 кг/м<sup>3</sup>.

Эксперименты проводились при разных высотах  $h$  плотного слоя: 40 мм, 50 мм и 156 мм. Моделирование при помощи сплошных сред позволило изучить поведение кипящего слоя при высотах плотного слоя до 1 м.

Используемая математическая модель описана в [3].

Порозность, падение давления, частота образования пузырей, частота извержения пузырей, распределение объемных долей порошка в объеме аппарата являются основными характеристиками, по которым проводилось сравнение моделирования и экспериментов. Колебания порозности и падения давления фиксировались в трех точках. Для опытов с высотой плотного слоя 40 мм точка 1 находилась на высоте 6,75 мм от днища, точка 2 на высоте 20,25 мм и точка 3 на высоте 38,25 мм от днища установки. Для опытов с высотой плотного слоя 50 мм точка 1 находилась на высоте 6,75 мм от днища, точка 2 на высоте 24,75 мм и точка 3 на высоте 51,75 мм от днища установки. Для опытов с высотой плотного слоя 40 мм точка 1 находилась на высоте 6,75 мм от днища, точка 2 на высоте 83,25 мм и точка 3 на высоте 159,75 мм от днища установки.

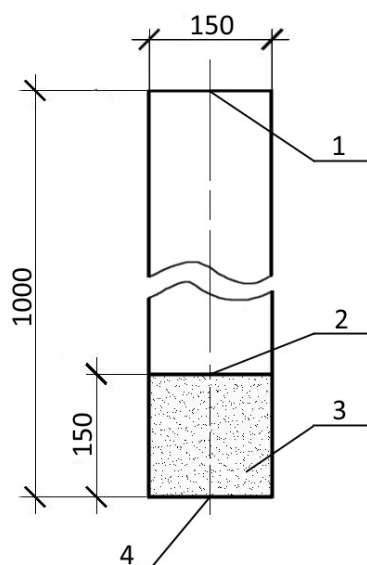


Рис. 1. Принципиальная схема установки. 1 – выход газа; 2 – уровень дисперсного материала до начала псевдоожижения; 3 – слой дисперсного материала (угля); 4 – донное дутьё

Объемная доля исследуемой фазы определяется из соотношения

$$vof = \frac{V_k}{V_c}, \quad (1)$$

где  $V_k$  – объем исследуемой фазы,  $V_c$  – объем клетки сетки,  $m^3$ .

Порозность рассчитывается на основании (1) по соотношению

$$\varepsilon = 1 - vof. \quad (2)$$

Построение и анализ графиков исследуемых величин, показал, что колебания давления  $P$ , Па в контрольных точках [4], полученные по модели Эйлера и Лагранжа совпадают (рис. 2). При этом колебания порозности (2) в этих же точках у данных моделей несколько отличаются по амплитуде и частоте (рис. 3).

Данные колебания, однако, ещё позволяют описать процесс с качественной точки зрения. Из графика видно, что порозность в точке 1 не превышает значения 0,6, тогда, как порозность в

точке 2 доходит до максимального значения 0,7, а порозность в точке 3 пробивает отметку 0,8. Амплитуда колебаний порозности в точке 3 превышает амплитуду колебаний порозности в точке 1 более, чем в 2 раза. Колебания в точке 1 и точке 3 происходят в противофазе но с примерно одинаковой частотой. В момент зарождения пузыря в точке 3 слой уплотняется, по мере движения пузыря через слой растет порозность в точке 3, и возрастает объемная доля сыпучего материала в точке 1.

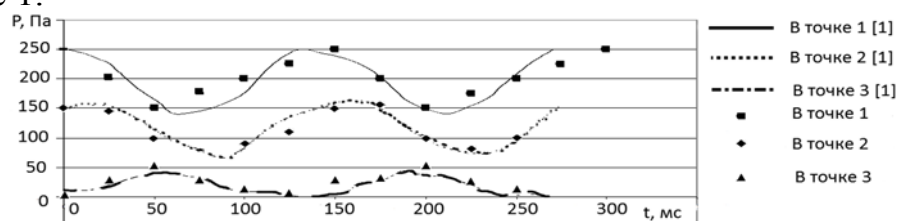


Рис. 2. Изменение давления от времени в точках 1, 2, 3 при высоте слоя 40 мм

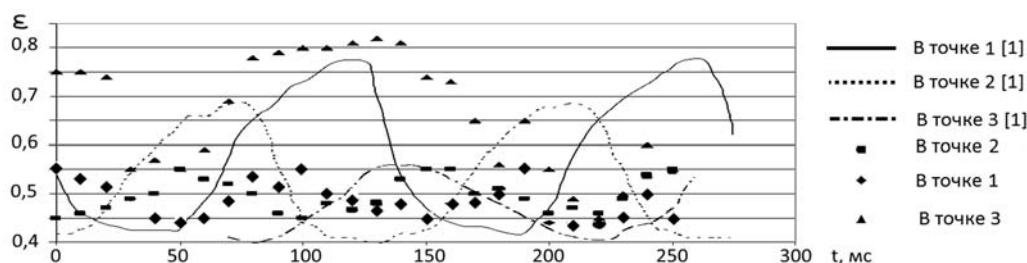


Рис. 3. Изменение порозности от времени в точках 1, 2, 3 при высоте слоя 40 мм

Весьма хорошее сходство моделей дают графики частоты извержения и образования пузырей от высоты слоя засыпки. Так из рис. 4 следует, что при высоте слоя до 150 мм имеется практически полное равенство частот извержения  $f$ ,  $s^{-1}$

между моделями Эйлера, Лагранжа и опытными данными. Однако после данного рубежа обе модели дают некоторое отклонение от эксперимента с сохранением общего тренда.

На графиках, приведенных ниже, черными треугольниками, ромбами и квадратами обозначены значения, полученные в результате моделирования на основе сплошных сред. Сплошными и пунктирными линиями показаны оцифрованные графики, полученные путем дискретного моделирования [1].

Поскольку рассматривается установившийся режим псевдоожижения, то на графиках момент  $t = 0$  мс не соответствует началу процесса псевдоожижения.

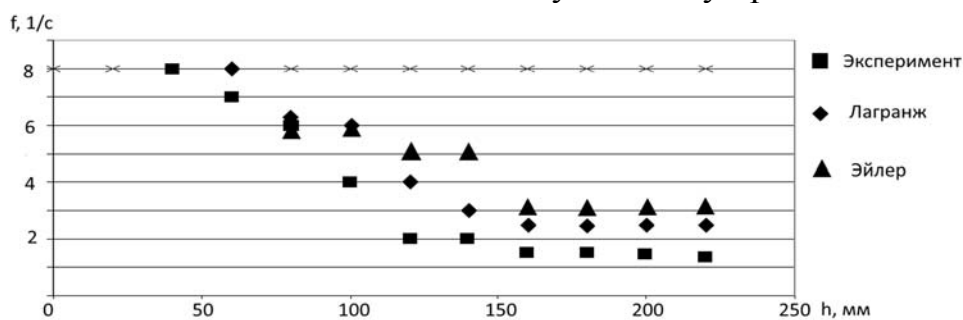


Рис. 4. Частота извержения пузырей от высоты слоя для скорости потока газа 0,563 м/с

В ходе решения была воссоздана модель экспериментальной установки Дж. Дэвидсона и К. Бойса [1], были построены графики изменения давления, объемных долей и частот извержения и образования пузырей от высоты слоя запыски. Результаты расчетов по методу многофазных сплошных сред удовлетворительно совпадают с опытными данными К. Мюллера (2007) [2] и результатами дискретного моделирования (модель Лагранжа) [1], что свидетельствует о применимости использованной физико-математической модели к проблеме описания гидродинамики пузырькового кипящего слоя.

Таким образом, метод многофазного моделирования сплошных сред может весьма успешно применяться в задаче моделирования пузырькового кипящего слоя. Данный метод, очевидно, требует значительно меньшей вычислительной мощности, чем дискретное моделирование, а любые его несоответствия с последним могут быть устранены с помощью программирования и введения в модель эмпирических зависимостей, что требует дополнительных исследований.

#### Список использованных источников

1. Boyce C. M., Davidson J. F., Holland D. J., Scott S. A., Dennis J. S. The origin of pressure oscillations in slugging fluidized beds: Comparison of experimental results from magnetic resonance imaging with a discrete element model // *Chemical Engineering Science*. 2014. Vol. 116. P. 611–622.
2. Müller C. R., Davidson J. F., Dennis J. S., Fennell P. S., Gladden L. F., Hayhurst A. N., Mantle M. D., Rees A. C., Sederman A. J. Oscillations in gas-fluidized beds: ultra-fast magnetic resonance imaging and pressure sensor measurements // *Powder Technol.* 2007. № 177. P. 87–98.
3. Müller C. R., Scott S. A., Holland D. J., Clarke D. C., Sederman A. J., Dennis J. S., Gladden L. F. Validation of a discrete element model using magnetic resonance measurements. *Particuology*. 2009. № 7. P. 297–306.
4. Baskakov A. P., Tuponogov V. G., Filippovsky N. F. A study of pressure fluctuations in a bubbling fluidized bed // *Powder Technol.* 1986. № 45. P. 113–117.